

Rubberpersen

Een aantrekkelijk proces voor het MKB

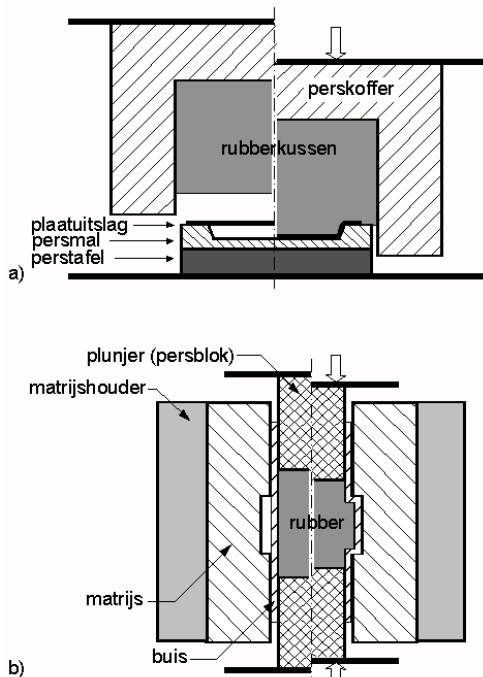
Rubberpersen is een plaatvervormingsproces, waarbij één of meer productgebonden mallen (of matrijzen) en een rubberkussen (als tweede matrijshelft) worden toegepast. Omdat het rubberkussen universeel is, kan het rubberkussen worden gebruikt voor vele verschillende productvormen. Tijdens de perscyclus vervormt het rubber de platine over of in de productgebonden matrijs, waarbij het rubber elastisch vervormt. Na het wegnemen van de belasting veert het rubber terug naar de oorspronkelijke vorm, terwijl de plaatuitslag de gewenste productvorm heeft gekregen. Het belangrijkste voordeel van het rubberpersen is de lage gereedschapskosten. Daardoor is het rubberpersen geschikt voor een productengamma met vele verschillende vormen gemaakt in kleine series. Verder is het mogelijk rubberpersen toe te passen voor producten met gepolijste oppervlakken of producten van voorbeklede plaat en behoort het van binnenuit vervormen van buis ook tot de mogelijkheden. De investeringen, die nodig zijn om het proces te implementeren op een bestaande hydraulische pers, zijn laag.

Inhoud

1 Rubberpersen van plaat en buis	1
2 Uitvoering van het rubberpersen	2
3 Wanneer rubberpersen?	2
4 Voordelen en beperkingen	4
5 Toepassingsgebieden	5
6 Maakbaarheidsanalyse van de hoofdvorm	5
7 Maakbaarheidsanalyse van detailvormen	8
8 Uitgewerkte voorbeelden	9
9 Economie van het rubberpersen	10
10 Literatuur	11
11 Bijlage	12

1 Rubberpersen van plaat en buis

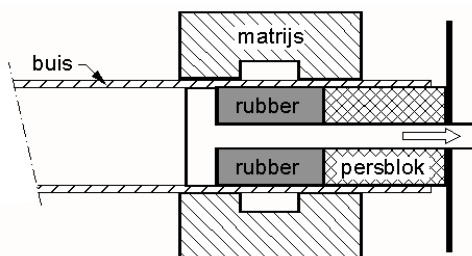
Rubberpersen is een zeer eenvoudig proces. Er zijn twee gereedschappen nodig om een plaat of buis te vervormen: een vaste matrijs, die de plaat of buis de gewenste eindvorm geeft en een rubberen matrijs, die tijdens de perscyclus over of in de vaste matrijs gedrukt wordt (zie figuur 1). Tijdens het persen vervormt het rubber en wordt de plaat of buis tegen de vaste matrijs gedrukt. Het rubber oefent over het gehele oppervlak van het product een druk uit. De drukverdeling over het productoppervlak is afhankelijk van o.a. de productvorm en de vorm en samenstelling van het rubberen gereedschap.



figuur 1 Principes voor het rubberpersen van plaat (a) en buis (b)

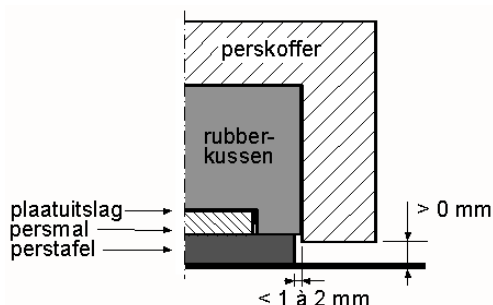
Bij het rubberpersen van plaat bestaat de rubberen matrijs uit een massief rubberen blok dat in een perskoffer is geplaatst (zie figuur 1a). De rubberen matrijs is niet productgebonden. Voor een effectief gebruik van het rubber moet het rubberblok geplaatst zijn in een sterke metalen behuizing, een perskoffer. Deze behuizing dient ervoor om het rubber op te sluiten en daardoor een hoge persdruk uit te kunnen oefenen op de plaatuitslag (platine).

Bij het rubberpersen van buis (zie figuur 1b) heeft het rubberkussen meestal de vorm van een cilinder. De buis is geplaatst in een matrijs die uit twee delen bestaat, om het product uit te kunnen nemen. Deze twee delen moeten tijdens het persen worden bijeengehouden door een matrijshouder of een kleminrichting. In de praktijk wordt vaak, met name voor buisuiteinden, de configuratie gebruikt, zoals die in figuur 2 is te zien. Bij het ontbreken van een metalen behuizing (matrijs) zal dit leiden tot het 'vrij' vervormen van het uitgangsmateriaal met als gevolg een ongewenste geometrie en een vroegtijdige scheurvorming van het productmateriaal.



figuur 2 Rubberpersen bij een buiseinde

Voor beide methoden geldt dat de behuizing het rubber goed moet opsluiten. Bij het persen van plaat mag de perstafel waarop de vormvaste matrijs ligt, slechts een geringe speling (hooguit 1-2 mm) hebben t.o.v. de perskoffer (zie figuur 3). Wordt de speling groter, dan is er kans op beschadiging van het rubberkussen.



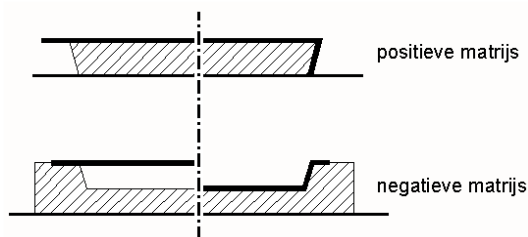
figuur 3 Opsluiten van het rubber, speling tussen perskoffer en perstafel

2 Uitvoering van het rubberpersen

Om beter inzicht te krijgen in het proces, wordt een korte beschrijving gegeven van een rubberperscyclus voor een plaatproduct. Een perscyclus voor een buisproduct is vergelijkbaar. Als uitgangssituatie wordt een hydraulische pers genomen, waarbij op het onderbed een perstafel is geplaatst en tegen het bovenbed de perskoffer met het rubberkussen is gemonteerd. Op de perstafel wordt vervolgens de rubberpersmal geplaatst met daarop de plaatuitslag. De rubberpersmal heeft niet nauwkeurig te worden uitgelijnd t.o.v. de perskoffer en kan los op de perstafel geplaatst worden hetgeen een snelle malwisseling mogelijk maakt. Tijdens het persen wordt de perstafel met persmal en plaatuitslag in de perskoffer gedrukt, waarbij het rubber de plaat over de persmal vormt. Tijdens de gehele perscyclus mogen de perskoffer en perstafel geen contact met elkaar maken.

Als de maximale kracht is bereikt, wordt de kracht 5 à 10 seconden aangehouden. Na het wegnemen van de kracht veert het rubber terug naar zijn oorspronkelijke vorm en is het product gereed. Het product kan worden uitgenomen en een nieuwe plaatuitslag kan op de persmal worden gelegd, waarna de perscyclus kan worden herhaald.

Voor het rubberpersen van producten kan gebruik worden gemaakt van twee malprincipes: Persen met een positieve en persen met een negatieve matrijs (zie figuur 4).



figuur 4 Twee matrijsprincipes: positieve en negatieve matrijzen

2.1 Positief rubberpersen

Op een positieve matrijs worden bij voorkeur producten met flenzen (geflensde producten) geperst. De flenzen aan dergelijke producten zijn meestal gekromd of bevatten ingeperste details. Bij dit malprincipe moet de plaatuitslag op de mal worden gepositioneerd door middel van positioneerpennen of andere positioneermiddelen. De plaatuitslag kan vaak vooraf 'pas' worden gemaakt, zodat na het persen het product gereed is en geen nabewerking, zoals het aftrimmen van flenzen of randen, meer nodig is. De belangrijkste vervormende bewerking bij het positief persen is het buigen van flenzen over gebogen buiglijnen. Voor rechte flenzen en rekflenzen worden de mogelijkheden begrensd door de materiaaleigenschappen. Bij krimpflenzen, waarbij het materiaal in de flens wordt gestuikt, zullen in de flens meestal plooien ontstaan, die bij toenemende persdruk weer moeten worden weggeperst. Dit lukt bij zware plooivorming niet altijd, omdat de platgedrukte plooien vaak als zodanig zijn te herkennen. De knikstijfheid van de flens, o.a. afhankelijk van de flenshoogte, de contourradii en plaatdikte, speelt hierbij een belangrijke rol.

2.2 Negatief rubberpersen

Bij het negatief rubberpersen wordt de plaatuitslag in een vormholte geperst. Daardoor ontstaan dubbelgekrumde, dieptrekachtige producten. De positionering van deze productvormen gebeurt door middel van aanslagpennen of -nokken die ingebouwd worden in de mal. Door de vervorming van de plaatuitslag, een combinatie van dieptrekken en strekken, moet de plaat na het persen nog worden nabewerkt. Bij het persen met een negatieve mal

moet de mal ook ontluicht worden. Omdat het rubber onder druk de vormholte volledig afsluit, zal opgesloten lucht de vervorming tegenwerken. Een klein gaatje in de bodem van de mal moet dit voorkomen.

De vervorming van de plaatuitslag bij het negatief rubberpersen is vergelijkbaar met het dieptrekken. Tijdens het begin van de persslag wordt de rand van de plaatuitslag in omtreksrichting gestuikt en in de trekrichting gerekt. Eventuele plooivorming wordt tegengegaan door het rubber, dat tevens als plooihouder fungeert. In tegenstelling tot het dieptrekken is het niet mogelijk de plooihouderdruk te manipuleren. Zeer plooigevoelige producten kunnen worden geperst met een stalen plooihouderring. Deze ring biedt meer weersstand tegen plooivorming dan het rubber. Aan het einde van de persslag wordt het materiaal lokaal gerekt (zie ook § 3.4.2).

2.3 De pers

Rubberpersen kan in principe plaatsvinden op een enkelvoudig werkende, bij voorkeur hydraulische pers. Bepalend voor de mogelijkheden is de capaciteit van de pers. De persdrukken en perskrachten die optreden bij het rubberpersen zijn hoog. Rubberpersen, dat geschikt is voor plaatmaterialen met een dikte tot 2-3 mm, wordt meestal uitgevoerd met persdrukken in de range van 300-700 bar (30-70 MPa). Omgerekend naar productgrootte betekent dit, dat voor een 400-tons pers de grootte van de plaatuitslag, afhankelijk van de persdruk, kan variëren van 600 - 1300 cm² (A4- tot A3-formaat). De hoogten van de persdrukken zijn het gevolg van het vervormen van het rubber tijdens het rubberpersen. Hoewel dit vervormen essentieel is voor het vervormen van de plaatuitslag over de persmal, zorgt het vervormen van het rubber anderszids voor een aanzienlijke verhoging van de benodigde perskracht. Slechts een klein deel van de benodigde perskracht wordt dus benut voor het vervormen van de plaatuitslag, een groot deel is nodig om het rubber te vervormen. Een ander gevolg van de hoge persdrukken is, dat de perskoffer zwaar belast wordt en daarom een relatief zware constructie moet zijn.

3 Wanneer rubberpersen?

Of een bepaalde productvorm te rubberpersen is, hangt af van een aantal variabelen. Productkenmerken zijn:

- ▶ productmateriaal;
- ▶ de plaatdikte;
- ▶ de grootte van de plaatuitslag;
- ▶ de vorm van het product;
- ▶ overige productkenmerken zoals buigradii, details en oppervlaktekwaliteit.

Elk productkenmerk wordt hieronder kort behandeld om inzicht te geven in de wijze waarop de maakbaarheidsanalyse plaatsvindt.

3.1 Productmateriaal

In principe leent rubberpersen zich voor alle bekende plaatmaterialen voor vervormingsdoeleinden, zoals bijvoorbeeld de staaltypen DC01 t/m DC06 enz., de roestvaststaaltypen AISI 304, 316 enz. en de aluminiumsoorten Al 99,5, AlMg3 enz..

3.2 De plaatdikte

Rubberpersen is een methode die geschikt is voor het persen van plaat met een dikte tot 2 à 3 mm. Bij zeer eenvoudige productvormen en/of zachte materialen (lage vloeigrens) kan plaat met een grotere dikte worden geperst.

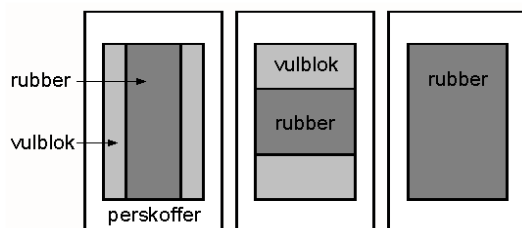
Als de plaatdikte groter wordt, zijn zeer grote persdrukken nodig om de plaatuitslag in de matrijsholte te persen en over de buiglijnen te buigen, waardoor de vormcomplexiteit sterk afneemt. De vloeigrens speelt hierbij een belangrijke rol: een materiaal met een lage vloeigrens

kan tot grotere plaatdikten gerubberperst worden dan een stug materiaal. Sommige materialen (o.a. bepaalde aluminiumlegeringen) zijn goed warmtebehandelbaar, zodat de vloeigrens kunstmatig kan worden verlaagd. Het product kan ook in meerdere stappen worden gemaakt (met een tussentijdse warmtebehandeling).

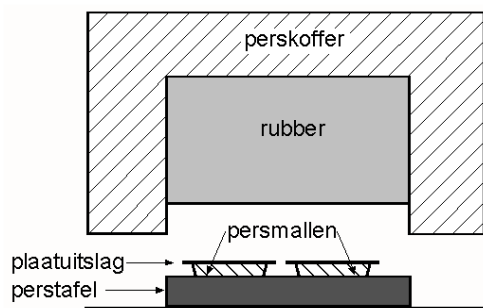
3.3 De grootte van de plaatuitslag

De grootte van de plaatuitslag bepaalt de grootte van de perskoffer die nodig is en daarmee de maximale persdruk die (met de gegeven maximale perskracht) toe te passen is. De perskoffer wordt niet ontworpen voor één product, maar voor meerdere productvormen. Het grootste product bepaalt de maximale inwendige afmetingen van de perskoffer.

Als de afmetingen van de verschillende producten sterk variëren, kan worden overwogen de perskoffer zodanig te ontwerpen, dat het persoppervlak van het rubber verkleind kan worden (zie figuur 5). Hiervoor kunnen metalen 'vulblokken' worden gebruikt. Door een deel van de perskoffer met deze blokken op te vullen, en een kleiner rubberkussen de resterende ruimte te laten innemen, kunnen kleinere producten met grotere persdruk geperst worden. Daarbij moet bedacht worden, dat de persdruk omgekeerd evenredig is met de grootte van het persoppervlak ($\text{persdruk} = \text{perskracht} : \text{persoppervlak}$). Als alternatief kan men er ook voor kiezen, bij gelijkblijvende inwendige afmetingen en persdruk, meerdere kleine producten gelijktijdig te persen (zie figuur 6).



figuur 5 Toepassing van vulblokken ter verkleining van het persoppervlak (verhoging persdruk)



figuur 6 Rubberpersen waarbij meerdere producten gelijktijdig worden geperst

De maximale persdruk is een belangrijke parameter (omdat de maximale persdruk de mogelijkheden bepaalt t.a.v. de vormcomplexiteit van het product, maximale plaatdikte en de aard van het productmateriaal). Naarmate deze groter is, kan de productvorm complexer en de plaatdikte groter zijn.

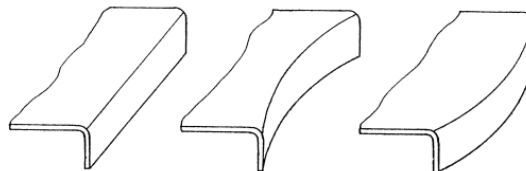
3.4 De vorm van het product

De vorm van het product kan worden opgedeeld in hoofdvorm en detailvormen. Bij dit productkenmerk wordt alleen gekeken naar de hoofdvormen; de detailvormen worden onder 3.5 behandeld. De hoofdvormen worden onderscheiden in geflensde productvormen en 'dieptrekachtige' productvormen. Geflensde producten

worden bij voorkeur geperst op een positieve matrijs, 'dieptrekachtige' producten worden geperst met een negatieve matrijs (zie figuur 4).

3.4.1 Geflensde productvormen

Het rubberpersen met een positieve matrijs wordt in hoofdzaak toegepast op geflensde producten, producten met als hoofdvorm: een (vlakke) lijfplaat en flenzen aan de omtrek. De flenzen kunnen recht of gekromd zijn, hetzij rek- of krimpflenzen (zie figuur 7). Belangrijk kenmerk van deze producten is, dat de flenzen niet met elkaar verbonden zijn (zie figuur 8).



figuur 7 Flenstypen



figuur 8 Een voorbeeld van een geflensd product; aluminium 2024; geperst in W-toestand (oplosgegloeid en afgeschrikt). Toegepast als T3-toestand (natuurlijk uitgehard)

De krimpflens is bij deze productvormen de meest kritieke flenssoort. Omdat bij het maken van een krimpflens het dunne plaatmateriaal de neiging heeft tot plooiwringing, is het persen van krimpflenzen maar beperkt mogelijk (zie hoofdstuk 6). Dit is tevens de verklaring voor de eis dat de flenzen niet aaneengesloten mogen zijn. Als twee flenzen aan elkaar worden verbonden, dan is de verbindingsflens bijna altijd een krimpflens met een kleine kromtestraal; deze zijn niet te persen zonder plooiën. Naast de hoofdvorm kunnen in geflensde producten ook allerlei detailvormen worden meegeperst: kraaggaten, joggels, verstijvingsrillen en andere detailvormen. Meestal moet per detailvorm (zie hoofdstuk 7) bekeken worden of deze maakbaar is.

3.4.2 Dieptrekachtige producten

Bij het toepassen van een negatieve matrijs, waarbij de platine in de holle vorm van de matrijs wordt geperst, ontstaan dieptrekachtige productvormen: productvormen die vergelijkbaar zijn met dieptrekproducten. De vervorming van de platine tijdens het negatief rubberpersen is analoog aan hetgeen bij het dieptrekken plaatsvindt: de rand van de platine wordt naar binnen getrokken en (deels) omgezet in de verticale productwand. Tijdens de bewerking dient het rubberkussen als "stempel" en als "plooihouder". Dit resulteert in producten, waarbij de productwanden (en flenzen) aaneengesloten kunnen zijn. Verbindingsflenzen met kleine kromtestralen zijn hier geen probleem, omdat het materiaal nu wordt gerekt in plaats van gestuikt.

Naast de hoofdvorm kunnen, door de alzijdige druk van het rubberkussen, nu ook allerlei details in het product worden aangebracht; deze details worden aangebracht in dezelfde perscyclus.

In tabel 1 wordt een schematisch overzicht gegeven van de hoofd- en detailvormen met bijbehorende matrijsprincipes.

tabel 1 Schematisch overzicht van hoofd- en detailvormen

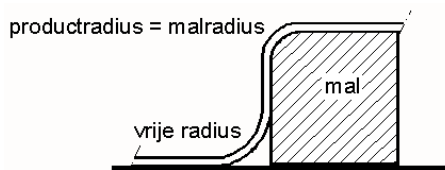
	geflensde producten (positieve mal/matrijs)	dieptrekachtige producten (negatieve mal/matrijs)
hoofdform	Niet aaneengesloten flenzen rechte flens, rekflens krimpfens	Aaneengesloten flenzen en wanden rotatiesymmetrisch, rechthoekig, conisch
detailform	o.a. kraaggaten, verstijvingsrillen	o.a. rillen, doorzettingen

3.5 Overige productenmerken

Soms bepalen de productdetails de manier waarop een product gerubberperst wordt. Deze productenmerken, zoals buigradii, details en oppervlaktekwaliteit bepalen dan de keuze van de matrijs (positief of negatief) en daarmee ook de vervormingsmogelijkheden.

Bij het rubberpersen van plaat over een matrijs kunnen er twee typen buigradii ontstaan (zie figuur 9), namelijk buigradii waarbij de plaatuitslag de buigradius van de matrijs overneemt, en zogenaamde vrije buigradii. In de eerste situatie moet de malradius groter zijn dan de minimale buigradius van het plaatmateriaal. De grootte van een vrije buigradius is afhankelijk van de plaatdikte, de persdruk en de vloeigrens van het materiaal. Naarmate de persdruk groter is, de plaatdikte kleiner en de vloeigrens lager, is de buigradius kleiner.

Als bijvoorbeeld een bepaald product gespecificeerde buigradii moet hebben, i.v.m. het uiterlijk van het product, kan dit de keuze van het matrijsprincipe (positief of negatief) bepalen. Dit kan dan in strijd zijn met de keuze die gemaakt zou worden op grond van de globale productvorm. In dat geval moet dan vaak hulpgereedschap worden bedacht om toch de gewenste productvorm te kunnen maken. Eenzelfde redenering is mogelijk bij andere productdetails (rillen, joggels, enz.) die op grond van bijvoorbeeld nauwkeurigheid een bepaald matrijsprincipe nodig maken. Zo kan ook de oppervlaktekwaliteit het matrijsprincipe bepalen.



figuur 9 Twee soorten buigradii: productradius gelijk aan de matrijsradius en de vrije buigradius

4 Voordelen en beperkingen

4.1 De voordelen

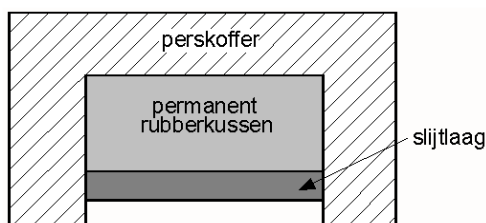
- Het belangrijkste voordeel van het proces is de toepassing van goedkoop gereedschap. De gereedschapkosten kunnen laag zijn, omdat slechts één van de matrijsen productgebonden is. Deze vaste matrijs draagt de gewenste vorm over op het product en kan (mede door de beperkte seriegrootte) ook gemaakt worden van goedkope gereedschapmaterialen. Hierdoor kunnen de kosten verder worden verlaagd. Voorbeelden van dergelijke materialen zijn vaste, gelamineerde houtsoorten en gietharsen. De tweede matrijs wordt gevormd door het rubber-

kussen. Deze is universeel en toepasbaar voor een grote variëteit van verschillende productvormen.

- Bovendien behoeven beide matrijshelften niet ten opzichte van elkaar te worden afgestemd of te worden uitgelijnd, hetgeen de kosten ook aanzienlijk verlaagt.
- Een tweede voordeel is, dat in principe alle gewenste vervormingen in één perscyclus kunnen worden aangebracht. Niet alleen de hoofdvorm, maar ook allerlei vormdetails kunnen in dezelfde bewerkinggang worden gemaakt. Dit kan het aantal bewerkingstappen verkleinen. Indien nodig kan een product ook in meerdere stappen gerubberperst worden, eventueel met een tussentijdse warmtebehandeling van het plaatmateriaal.
- Het derde voordeel is dat het rubber een zacht gereedschapmateriaal is, hetgeen het proces geschikt maakt voor het persen van plaatmateriaal met kwetsbare oppervlakken. Gedacht kan worden aan beklede plaat en plaat met een gepolijst of hoogglans oppervlak. Hier staat tegenover, dat de wrijvigingskrachten, tussen het rubber en het productmateriaal aanzienlijk hoger zijn dan bij stalen gereedschappen. Deze hogere wrijvigingskrachten verhogen de kans op scheurvorming.
- Op eenzelfde persmal kunnen verschillende plaatmaterialen of verschillende plaatdikten worden geperst. Hoewel verandering van plaatmateriaal tijdens het productieproces niet vaak zal voorkomen (wel bij het maken van prototypen).
- Bij kleinere producten is het mogelijk tijdens dezelfde persgang meerdere delen gelijktijdig te vervormen.
- De omsteltijden van het ene op het andere product zijn minimaal. Het enige dat gedaan moet worden is het vervangen van de vaste persmal en aangezien deze los op de perstafel ligt en niet hoeft te worden uitgelijnd is de omsteltijd nagenoeg nihil.
- De investeringskosten, nodig om een bestaande hydraulische pers geschikt te maken voor het rubberpersen, zijn gering. Als voorbeeld: voor een 400-tons pers kost een perskoffer gemaakt met bijbehorende rubberkussens en perstafel circa € 8.000,--.

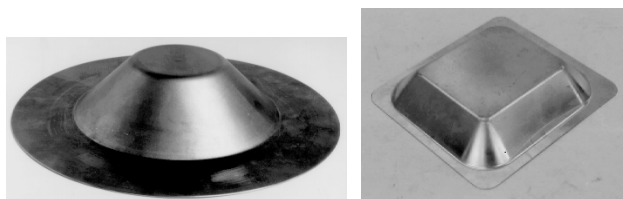
4.2 De beperkingen

- De belangrijkste beperking is de grootte van de perskracht die nodig is om een product te rubberpersen, zoals hiervoor reeds is aangegeven. Toepassing van een grotere respectievelijk kleinere pers maakt het mogelijk grotere dan wel kleinere producten te rubberpersen. De productgrootte is evenredig met de perskracht van de pers.
- De cyclustijd van het rubberpersen is relatief groot. Gedacht moet worden aan 0,5 tot 1 minuut per product. Mede daardoor zullen de machinekosten bij productseries groter dan 2.000 - 5.000 stuks het voordeel van de goedkope gereedschappen teniet doen. Bij welke seriegrootte het omslagpunt ligt, hangt af van de productvorm en de alternatieve productieprocessen.
- Een mogelijke beperking is de slijtage van het rubberkussen. De standtijd van het oppervlak van het rubberkussen is beperkt van enkele duizenden tot enkele tienduizenden perscycli. Het aantal persslagen is afhankelijk van de belasting van het rubberkussen (productvorm, materiaaleigenschappen en dikte van de plaat). Om te voorkomen dat steeds het gehele rubberkussen moet worden vervangen, wordt meestal een zogenaamde slijtlaag toegepast (zie figuur 10): een rubber laag van 1 à 2 cm, die gekeerd en vervangen kan worden als de slijtage te groot is geworden.
- Het rubberpersen is een eenvoudige 'single-action' vervormingsmethode. Dit betekent dat het niet mogelijk is de vervormingskrachten t.o.v. de plaatuitslag te sturen. Dit heeft tevens tot gevolg dat de complexiteit van de producten (bijvoorbeeld uitgedrukt in een hoogte/diameter-verhouding) geringer is dan voor bijvoorbeeld bij het dieptrekken.



figuur 10 Opdeling van het rubberkussen in een permanent kussen en een slijtlaag

Samengevat is het rubberpersen een goedkope, flexibele productiemethode voor dubbelgekromde, kleine producten, die in kleine series worden vervaardigd. Ook producten met conische wanden zijn zeer goed te rubberpersen (zie figuur 11).



figuur 11 Enige voorbeelden van conische producten

5 Toepassingsgebieden

De toepassingsmogelijkheden worden voornamelijk begrensd door de seriegrootte en de productgrootte. De seriegrootte is begrensd, omdat bij grote productseries de relatief lange cyclustijd het kostenvoordeel van de goedkope gereedschappen gaat overheersen.

De grootte van de producten hangt af van de nominale perskracht en de afmetingen van tafel, alsmede de complexiteit van het product, materiaaldikte en de aard van het productmateriaal. Naarmate de perskracht toeneemt en/of de complexiteit van het product afneemt, kan de productgrootte toenemen. Ook de plaatdikte heeft een invloed op de productgrootte: als de plaatdikte toeneemt, zijn in het algemeen grotere perskrachten nodig en zal de maximale productgrootte afnemen. In het algemeen zal het rubberpersen daarom niet toepasbaar zijn voor grote producten, tenzij men beschikt over een uitzonderlijk grote pers (perskracht van 10.000 kN of meer).

6 Maakbaarheidsanalyse van de hoofdvorm

Opmerking:

De in deze publicatie gebruikte formules zijn verkregen uit de uitgevoerde experimenten en zijn dus empirisch van aard.

In deze beschrijving van de maakbaarheidanalyse van de hoofdvorm wordt dezelfde indeling aangehouden als in hoofdstuk 3: er wordt met het oog op de hoofdvorm onderscheid gemaakt tussen geflensde producten en dieptrekachtige producten. De geflensde producten zullen worden besproken in § 6.1; de dieptrekachtige productvormen worden behandeld in § 6.2.

6.1 Maakbaarheid van geflensde producten

Bij geflensde producten kunnen drie flenstypen worden onderscheiden: rechte-, rek- en krimpflenzen (zie figuur 7). Voor elk flenstype wordt een korte beschouwing gegeven betreffende de maakbaarheid.

Rechteflenzen

Voor rechteflenzen geldt dat alleen in de buigzone plastische deformatie optreedt en dat de buiglijn, een fictieve lijn waarover de plaat gebogen wordt, recht is.

De grootte van de buigradius t.o.v. van de plaatdikte bepaalt de grootte van de optredende rekken en de maakbaarheid van de betreffende flens. Als de maximale rek ($\epsilon_{\max}$ in %) in de buigzone de kritieke waarde overschrijdt, dan zal het materiaal insnoeren of breken. Deze kritieke waarde is afhankelijk van de materiaal soort en -toestand en kan worden afgeleid uit de breukrek die gemeten wordt bij een trekproef. Echter, de meeste materialen kunnen in de buigzone rekken bereiken die groter zijn dan de breukrek tijdens de trekproef (ϵ_{trek} of A_{80} in %), als gevolg van een gunstiger vervormingstoestand. De breuk tijdens de trekproef kan dan gezien worden als een conservatieve waarde. Als nu geldt dat (bij r = buigradius in mm, t = plaatdikte in mm):

$$\epsilon_{\max} = 0,5t/(r + 0,5t) \times 100 \% \quad [1]$$

$$\approx t/2r \text{ (benadering voor grote } r/t \text{ verhouding)}$$

dan moet gelden:

$$\epsilon_{\max} < \epsilon_{\text{trek}} \quad [2]$$

Met deze vergelijkingen is de minimale buigradius (r) te bepalen als de materiaaldikte (t) en de breukrek (ϵ_{trek}) van het materiaal gegeven zijn.

Rekflenzen

Bij rekflenzen zijn twee vervormingsgebieden aan te wijzen: de vervorming over de buigradius en de vervorming in het vlak van de flens. De vervormingstoestand in het vlak van de flens is gelijk aan de vervormingstoestand die optreedt bij een trekproef. Hier kan dus weer de breukrek van het materiaal worden gebruikt, gemeten door middel van een trekproef. Het verschil met de voorgaande paragraaf is nu, dat de breukwaarde niet meer een conservatieve waarde is, maar de "exacte" grenswaarde. Als nu geldt dat:

$$\epsilon_{\max} \approx H/R_{\text{con}} \quad [3]$$

dan moet gelden:

$$\epsilon_{\max} < \epsilon_{\text{trek}} \quad [4]$$

Met deze vergelijkingen is de maximale flenshoogte (H in mm) te bepalen als de contourstraal (R_{con} in mm) en de breukrek (ϵ_{trek} of A_{80} in %) van het materiaal gegeven zijn. Uiteraard kan men ook de minimale contourstraal bepalen als de flenshoogte gegeven is.

Krimpflenzen

Bij de derde flenssoort zijn er ook twee vervormingsgebieden: de vervorming over de buigradius, waarvan de minimale buigradius als hierboven bepaald kan worden, en het flensgedeelte. De vervorming in het vlak van de flens wordt niet door breuk begrensd, maar door plooi-vorming of plaatknik. De grenswaarden voor dit flenstype zijn veel lastiger te beschrijven dan voor de rek-flens, waarbij alleen de materiaaleigenschappen een rol spelen. De bezwijkvorm bij de krimpflens, het knikken of plooiën van de flens, wordt beïnvloed door materiaal-, proces- en geometrie parameters.

Voor aluminiumplaat is het plooi-/knikgedrag bij krimpflenzen onderzocht. Gegeven een bepaalde krimpflens kan de maximaal optredende rek worden berekend; deze wordt geometrische rek genoemd (ϵ_{geom}). Als deze geometrische rek kleiner is dan een kritieke waarde, dan is een krimpflens zonder plooiën te rubberpersen. Deze kritieke waarde, kritische rek (ϵ_{krit} in %) genoemd, is afhankelijk van met name de persdruk (P in bar), plaatdikte (t in mm) en de vloeigrens ($R_{0,2}$ in MPa) van het materiaal. Als de invloed van de persdruk buiten beschouwing wordt gelaten, dan is voor aluminiumlegeringen de volgende vergelijking geldig:

$$\epsilon_{\text{krit}} = -7,6 - 22,6t + (3,2t + 0,7) \times \ln(R_{0,2}) \text{ [%]} \quad [5]$$

Een krimpflens is maakbaar als geldt:

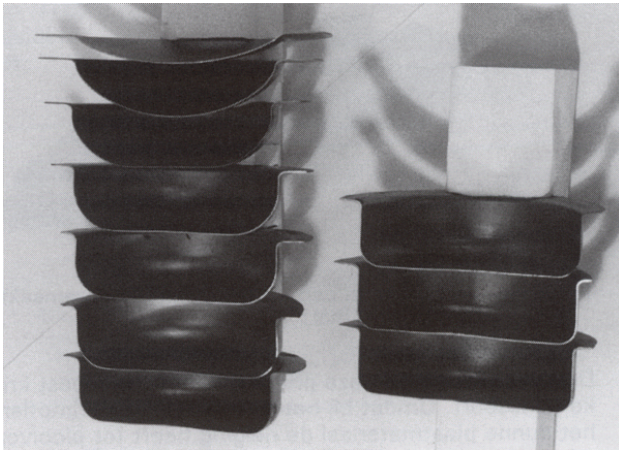
$$|\epsilon_{\text{geom}}| \approx H/R_{\text{con}} < |\epsilon_{\text{krit}}| \quad [6]$$

NB: beide waarden van de geometrische en kritische rek zijn negatief aangezien het hier om krimp dus een negatieve rek gaat.

Deze waarden gelden voor aluminiumlegeringen. Voor staal- en RVS-legeringen zullen soortgelijke vergelijkingen geldig zijn, maar de constanten, die in vergelijking [5] zijn ingevuld, zullen andere waarden hebben, mede omdat ook de E-modulus een andere waarde heeft.

6.2 Maakbaarheid van dieptrekachtige productvormen

Bij het maken van dieptrekachtige productvormen wordt de plaatuitslag geperst op een negatieve mal. Het rubberkussen werkt hierbij als "stempel" en als "plooihouder". Tijdens de bewerkingsslag wordt het materiaal naar binnen getrokken en vervormt het materiaal in eerste instantie op een wijze die vergelijkbaar is met dieptrekken. Als eenmaal de plaat contact maakt met de bodem van de matrijs, dan neemt de "stempelkracht" af en zal de vervorming overgaan in een strekvervorming. Deze vervormingen zijn weergegeven in figuur 12.



figuur 12 Dieptrekken en strekken bij het negatief rubberpersen. Persdruk neemt, van links naar rechts, toe van boven naar beneden

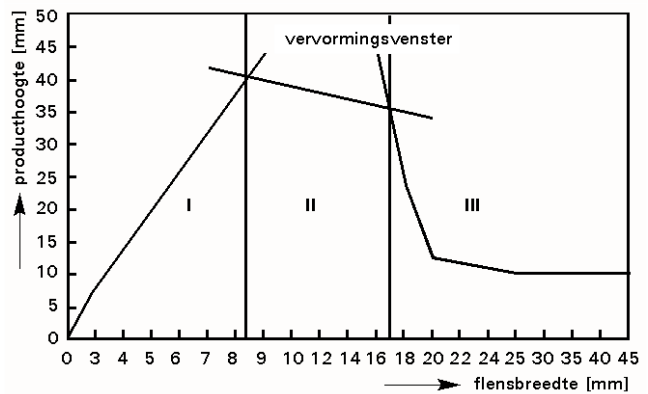
Als gevolg van deze vervormingen ontstaat er een "vervormingsvenster", waarin drie gebieden kunnen worden aangegeven:

- *gebied I*, waar alleen dieptrekvervormingen optreden; in dit gebied wordt de gehele platine in de holle vorm getrokken (hier is nog geen plooihouderwerking aan de orde);
- *gebied II*, waar de dieptrekvervorming wordt gevolgd door strekken; in dit gebied zijn de grootste hoogte/diameter verhoudingen mogelijk (hier is er sprake van een plooihouderwerking van de plaatrand, tussen matrijs en rubberkussen);
- *gebied III*, waar alleen strekvervorming optreedt; het materiaal in de flens zal t.g.v. de hoge "plooihouderkracht" niet naar binnen getrokken kunnen worden en de plaat scheurt bij de inloopradius van de mal.

Uit figuur 13 blijkt dat de vervormingmogelijkheden in gebied II veruit het grootst zijn. Bij de producten gemaakt in dit gebied hoort een specifieke range van flensbreedtes.

Ronde, rotatiesymmetrische producten met verticale wanden

De meest eenvoudige productvorm is de rotatiesymmetrische vorm met verticale productwanden (vergelijk de dieptrekbeke). De haalbaarheid voor deze productvorm kan worden uitgedrukt in een maximale producthoogte $h_{\max}$. Als men een producthoogte kiest, kleiner dan deze



figuur 13 Vervormingsmogelijkheden bij negatief rubberpersen (staal FeP04, $t = 1$ mm)

maximale producthoogte, dan kan het product gemaakt worden. De maximale producthoogte is primair afhankelijk van de maldiameter (D_{mal}), de plaatdikte (t), de persdruk en de breukrek, de r - en n -waarde van het materiaal tijdens een trekproef.

De waarden in de grafiek gelden voor een persdruk van 640 bar. Naarmate de persdruk afneemt, is een grotere $h_{\max}$ te bereiken, maar dit gaat ten koste van een sterke toename van de "vrije" buigradius, de bodemradius van het product. Bij relatief lage drukken gaat de plaat alleen "doorhangen": er ontstaat wel een duidelijke bolling van de plaat, maar de bodem van de matrijs wordt niet meer gehaald.

Voor een druk van 640 bar, een gegeven diameter (D_{mal} in mm) en een gegeven plaatdikte (t in mm), is de maximale producthoogte ($h_{\max}$ in mm) recht evenredig met de breukrek van het materiaal (A_{80} in %):

$$h_{\max} = 0,5 \times A_{80} + 6 \text{ [mm]} \quad [7]$$

De bijbehorende optimale breedte van de flens (fb_{opt} in mm) is:

$$fb_{\text{opt}} = 0,33 \times A_{80} + 7 \text{ [mm]} \quad [8]$$

NB: Daarbij wordt opgemerkt dat $D_{\text{mal}} + 2 \times fb_{\text{opt}} = D_{\text{platine}}$ en dat deze formules geldig zijn voor $D_{\text{mal}} = 100$ mm en $t = 1,0$ mm, maar niet afhankelijk zijn van de gekozen metaallegering.

Om de maximale producthoogte te berekenen voor een andere plaatdikte en/of maldiameter, kan gebruik worden gemaakt van de vergelijkingen:

$$h_{\max} = C_1 \cdot \sqrt{(D_{\text{mal}} \times t)} \quad [9]$$

$$\text{en } fb_{\text{opt}} = C_2 \cdot \sqrt{(D_{\text{mal}} \times t)} \quad [10]$$

Omdat de waarden van $h_{\max}$ en fb_{opt} voor $D_{\text{mal}} = 100$ en $t = 1,0$ bekend zijn, zijn ook de constanten C_1 en C_2 bekend. Hiermee kunnen dan voor de afwijkende maldiamenters en/of plaatdikten deze waarden worden berekend.

Rekenvoorbeeld 1

Stel een rotatiesymmetrisch product met verticale wanden heeft een diameter van 140 mm en een materiaaldikte van 1,2 mm. De breukrek van het materiaal is 32%. Uit de vergelijkingen [7] en [8] volgt: $h_{\max} = 22$ mm; $fb_{\text{opt}} = 18$ mm. Deze waarden zijn geldig bij een diameter van 100 mm en een wanddikte van 1,0 mm. Na invulling van deze waarden in [9] en [10] volgt: $C_1 = 2,2$ en $C_2 = 1,8$. Vervolgens kan nu de maximale producthoogte en de bijbehorende flensbreedte voor het beoogde product worden bepaald: $h_{\max} = 28,5$ mm en $fb_{\text{opt}} = 23,5$ mm.

Zoals hiervoor reeds is aangegeven, heeft ook de persdruk invloed op de maximale producthoogte. De producthoogte neemt toe naarmate de persdruk afneemt. Ruwweg

kan gesteld worden dat de maximale producthoogte met 50% toeneemt, als de persdruk wordt gehalveerd. Echter, er bestaat een omslagpunt waarbij de plaat de malbodem niet meer raakt ("doorhangen") en de "vrije" radius (zie hoofdstuk 7) neemt zeer sterk toe. Bovendien gelden deze waarden voor de rubberpersopstelling van de TU Delft; voor andere opstellingen kan de invloed geringer of groter zijn; de trends zullen echter overeenkomstig zijn.

Andere parameters die invloed kunnen hebben op de maximale producthoogte zijn de inlooppadius van de matrijs, de smering van de platine en de bekleding van de plaat. De invloed van de inlooppadius is gering, zolang de buigradius niet een waarde aanneemt, die dicht bij de minimale buigradius van het materiaal ligt (zie ook § 6.1). De invloed van de smering en het effect van beklede plaat worden in een aparte paragraaf behandeld.

Ronde, rotatiesymmetrische producten met conische wanden

In tegenstelling tot het klassieke dieptrekken is met het rubberpersen van producten met conische wanden een grotere maximale producthoogte te bereiken. Tijdens het persen wordt de productwand ondersteund door het rubber en de matrijs, waardoor secundaire plooivorming niet kan optreden.

De maximale producthoogte is direct af te leiden van de maximale producthoogte voor producten met verticale wanden met de vergelijking:

$$h_{\max, \text{conisch}} = \frac{h_{\max, \text{vert.}}}{1 - 0,5 \times \tan \alpha} \quad [11]$$

α is de hoek die de productwand met de verticaal maakt (zie figuur 14).



figuur 14 Definitie van de coniciteit, weergegeven met hoek α

Rekenvoorbeeld 2

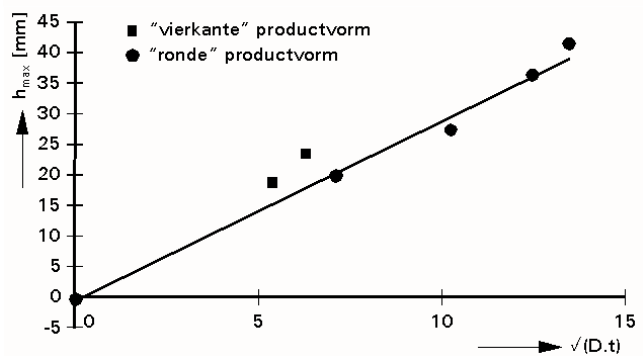
Uitgaande van het product omschreven in rekenvoorbeeld 1 kan nu worden bepaald hoe groot de maximale producthoogte wordt als $\alpha = 30^\circ$. Met $h_{\max} = 28,5$ mm voor een product met verticale productwanden wordt de maximale producthoogte voor het conische product: $h_{\max, \text{conisch}} = 40$ mm. Uiteraard moet ook de optimale flensbreedte worden aangepast (vermenigvuldigd met een factor $1/(1 - 0,5 \times \tan \alpha)$).

Vierkante/rechthoekige producten met verticale wanden

Voor vierkante of rechthoekige productvormen zijn er geen eenduidige rekenregels om daarmee de maximale producthoogte en de bijbehorende optimale flensbreedte te bepalen. Wel kan met de formules voor de ronde productvormen een conservatieve schatting van de maximale producthoogte worden gemaakt.

Voor de inschatting van de maximale producthoogte kan de hoekradius R gelijk gesteld worden aan $0,5 \times$ maldiameter, zoals deze gedefinieerd is bij rotatiesymmetrische producten. Duidelijk is dat naarmate deze radius groter is, de mogelijke producthoogte ook groter wordt; goed afgeronde hoeken bij rechthoekige producten zijn dus gewenst. Een dergelijke inschatting is een conservatieve waarde (zie figuur 15).

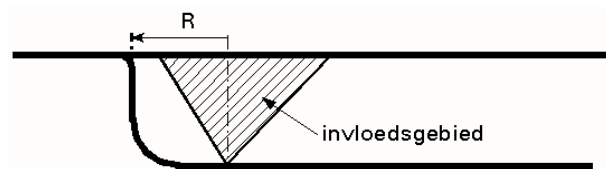
In werkelijkheid kunnen (iets) grotere producthoogten worden bereikt, omdat de rechte flenzen die aan de hoeken grenzen ook bijdragen aan de vervorming in de



figuur 15 Grenswaarden voor de maximale hoogte voor rechthoekige producten, vergeleken met de lijn van rotatiesymmetrische producten (staal FePO4)

hoek. Deze worden aangeduid als "invloedsgebieden": dat deel van de productwand of flens waar verhoging of verlaging van rekken optreedt door wederzijdse beïnvloeding.

De breedte van het invloedsgebied kan worden afgeschat op $2 \times$ producthoogte (zie figuur 16).



figuur 16 Schatting van de grootte van het invloedsgebied (zij-aanzicht) bij rechthoekige producten

Als deze breedte kleiner is dan de booglengte van de hoek, dan overlappen beide invloedsgebieden (links en rechts van de hoek) elkaar, hetgeen een verlaging van de rekken in de hoek tot gevolg heeft. Er zal dan een grotere producthoogte mogelijk zijn dan welke berekend wordt met de formules [7] - [10].

Rekenvoorbeeld 3

Stel een rechthoekig product heeft zijden van 150 en 200 mm. De hoekradius is voor alle hoeken gelijk: 25 mm. Verder heeft het materiaal een dikte van 1,2 mm en de breukrek van het materiaal is 40%. Uit de vergelijkingen [7] en [8] volgt: $h_{\max} = 26$ mm; $fb_{\text{opt}} = 20$ mm. Deze waarden zijn geldig bij een diameter van 100 mm en een wanddikte van 1,0 mm. Met deze waarden zijn nu de constanten C_1 en C_2 bekend: $C_1 = 2,6$ en $C_2 = 2,0$.

Vervolgens kan nu met de rekenregels voor ronde, rotatiesymmetrische producten de maximale producthoogte en de bijbehorende flensbreedte voor het beoogde product worden bepaald: $h_{\max} = 14,5$ mm en $fb_{\text{opt}} = 11$ mm. Dit zijn conservatieve waarden.

De booglengte van de hoek ($0,5 \times \pi \times R$) is ongeveer 23 mm. De breedte van het invloedsgebied is 29 mm ($2 \times 14,5$ mm). Er mag dus een grotere maximale producthoogte worden verwacht. De werkelijke maximale producthoogte zal (hooguit) enkele mm's groter zijn.

Vierkante/rechthoekige producten met conische wanden

Voor de vierkante productvormen met conische wanden geldt dezelfde benadering als voor de ronde productvormen met conische wanden: als men de (conservatieve) waarde van de maximale producthoogte voor een product met verticale wanden heeft berekend, dan kan men formule [11] toepassen om te berekenen hoe groot de producthoogte is voor het conische product.

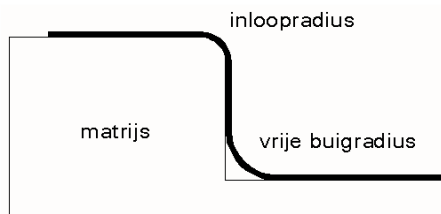
Invloed van smering; beklede plaat

Alle voorgaande waarden zijn gebaseerd op de afwezigheid van smering. Smering daarentegen kan met name bij negatief rubberpersen een gunstige invloed hebben op de grootte van de maximale producthoogte. Hoewel er geen eenduidige rekenregels kunnen worden vastgesteld, kan gesteld worden dat de maximale producthoogte met 25-50% toeneemt, afhankelijk van de materiaalsoort. Bij materialen met een kleine breukrek, bijvoorbeeld aluminiumlegeringen (breukrek in de orde van 15%), ligt de relatieve toename van de maximale producthoogte in de orde van 50%. Voor goed vervormbare staalsoorten en roestvaste staalsoorten (40-60% breukrek) is de relatieve toename van de maximale producthoogte geringer, in de orde van 25%, echter, de absolute toename (uitgedrukt in mm), is gelijk of groter. Het rubberpersen van beklede plaat heeft soms wel, soms geen voordelen. Voor verzinkte staalplaat is de toename van de producthoogte verwaarloosbaar. Men moet zelfs rekening houden met het eventuele loslaten van de oppervlaktelaag. Voor voorgelakte staalsoorten echter is wel een aanzienlijke toename van de maximale producthoogte te verwachten. Hier werkt de laklaag als een soort smering.

7 Maakbaarheidsanalyse van detailvormen

7.1 Vrije buigradius

Bij het persen met positief gereedschap zijn de buiglijnen boven op de mal gesitueerd. Tijdens het rubberpersen wordt het materiaal tegen de mal aangedrukt en neemt de plaat de buigradius van de mal aan. Na het wegnemen van de belasting veert het materiaal terug, maar zal de buigradius in het product nagenoeg gelijk zijn aan de radius van de mal. Hetzelfde geldt voor de inlooppadius bij negatief geperste rubberpersproducten. Dit geldt echter niet voor de bodemradius van negatief geperste rubberpersproducten: daar ontstaat een zogenaamde "vrije buigradius" (zie figuur 17).



figuur 17 Inlooppadius en vrije buigradius bij negatief rubberpersen

De grootte van deze vrije buigradius is afhankelijk van:

- ▶ *de persdruk* - hoe groter de persdruk hoe kleiner de buigradius. De persdruk ter plaatse van de vrije buigradius is mede afhankelijk van de producthoogte: een grotere producthoogte zal resulteren in een lagere lokale persdruk;
- ▶ *de plaatdikte* - hoe dikker de plaat hoe groter de buigradius;
- ▶ *het vloeigedrag van het materiaal* - materiaal met een lage vloeigrens geeft een kleinere vrije buigradius; bovendien heeft de breukrek van het materiaal invloed.

Uit testen is gebleken dat de grootte van het product (bijvoorbeeld de diameter) weinig invloed heeft op de vrije buigradius en dus buiten beschouwing kan worden gelaten.

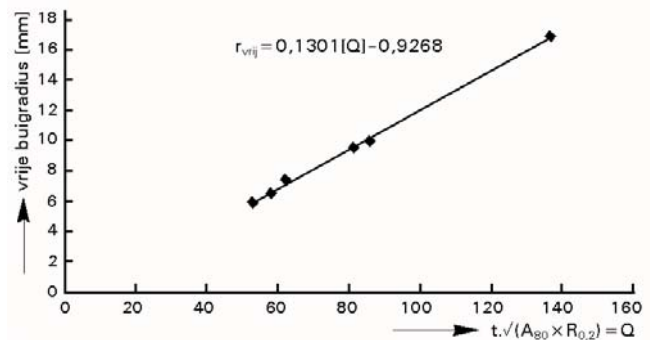
Een vergelijking die de vrije buigradius (r_{vrij}) benaderd is:

$$r_{vrij} = C \cdot t \cdot \sqrt{(A_{80} \times R_{0,2})} - 0,9268 \quad [12]$$

Hierin is C een constante ($\approx 0,13$), t de plaatdikte (in mm), A_{80} de breukrek (in %) van het materiaal gemeten bij

een trekproef en $R_{0,2}$ de vloeigrens (in MPa), ook gemeten bij een trekproef.

In figuur 18 is voor diverse materiaalsoorten en enkele plaatdikten het verband uit vergelijking [12] weergegeven.



figuur 18 Grootte van de vrije buigradius als functie van de breukrek, plaatdikte en vloeispanning

De persdruk komt in deze uitdrukking niet voor, omdat bij grote vrije buigradii het onderscheid met "doorhangen" verdwijnt. Wel kan gesteld worden dat het verband tussen de vrije buigradius en de persdruk P kan worden gegeven door:

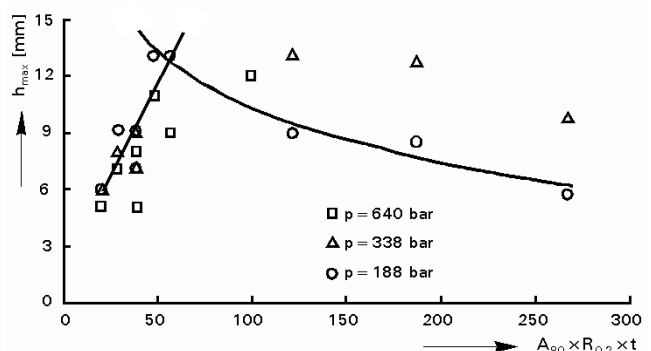
r_{vrij} is recht evenredig met $1/P$

7.2 Rillen en doorzettingen

Rillen en doorzettingen in een vlak plaatdeel dienen voor het verhogen van de buigstijfheid van het betreffende product. Dergelijke rillen worden vaak toegepast in plaatproducten. Een ril kenmerkt zich door een grote lengte/breedte verhouding. Een doorzetting is een lokale verdieping van de plaat met min of meer gelijke lengte/breedte verhoudingen. Bij rillen en doorzettingen zal het materiaal lokaal vervormen, omdat de hoge plooihouderkracht van het rubberkussen het "toevloeien" van materiaal verhindert.

Bij beide geldt dat er twee grenswaarden mogelijk zijn: breuk bij de inlooppadius of de bodemradius of het "doorhangen", dat ook reeds bij de dieptrekachtige productvormen was geconstateerd. De laatste grenswaarde is geen echte bezwijkvorm maar de betreffende ril kan niet hoger worden gemaakt, omdat de perskracht niet groot genoeg is.

Breuk van de plaat treedt eerder op naarmate de breukrek (A_{80}) van het materiaal en/of de plaatdikte kleiner is. Doorhangen treedt eerder op als de persdruk lager is, de vloeigrens hoger is en de plaatdikte groter is. Dit resulteert voor elke persdruk in een kromme die de maximale rilhoogte weergeeft, en die bestaat uit twee delen: een grenslijn die de breuk aangeeft en een kromme die de maximale hoogte aangeeft tijdens het "doorhangen".



figuur 19 Grenswaarden voor rillen.
Linkerlijn: breuk/scheuren van product,
Rechterlijn: "doorhangen" van het product

In figuur 19 zijn de maximale hoogten weergegeven van 3 persdrukken. Voor elke persdruk is een kromme uit twee delen te construeren. Dat is voor een persdruk van 188 bar uitgewerkt. Aan de linkerkant van de figuur, bij lage waarden van $\{A_{80} \times R_{0,2} \times t\}$ zal er breuk optreden. Dit deel van de kromme kan worden benaderd door een lineair stijgende lijn. Bij grote waarden van $\{A_{80} \times R_{0,2} \times t\}$ overheerst de grootte van de vloeispanning en treedt het "doorhangen" op: hier wordt de kromme het best benaderd door een dalende curve.

Opvallend is dat de grootte van de persdruk niet veel invloed heeft op de breuk die in een ril kan optreden (alle meetpunten voor de drie persdrukken liggen dicht bij elkaar), maar dat wel het "doorhangen" sterk afhankelijk is van de persdruk, zoals hierboven reeds is aangegeven. Verder heeft ook de breedte van de ril maar een beperkte invloed: naarmate de breedte toeneemt, zal de maximale hoogte van de ril enigszins toenemen.

7.3 Kraaggaten

Kraaggaten worden vaak in grote vlakke delen van producten geperst om het vlak van de plaat te verstijven en om deze lichter te maken. Omdat deze details een gelijke vervorming ondergaan als de vervorming in rekflenzen kunnen dezelfde vergelijkingen als voor rekflenzen ([1] - [4]) worden toegepast.

8 Uitgewerkte voorbeelden

8.1 Geflensde producten

Voor het maken van geflensde producten is een maakbaarheidstoets relatief eenvoudig; als voorbeeld is een krimpflens gekozen. In figuur 20 is een eenvoudig productvoorbeeld gegeven: een fietsonderdeel bestaande uit een vlakke lijfplaat met krimpflens aan de uiteinden en rechte flenzen tussen beide uiteinden. Het materiaal is een aluminiumlegering met een vloeigrens van 255 MPa en een dikte van 3 mm. De meest kritische delen zijn de krimpflenzen aan de uiteinden. De flenshoogte is 10 mm en de contourstraal is 55 mm.



figuur 20 Geflensd product

Met vergelijking [5] volgt dat de kritische rek van de krimpflens 18,3% is. Uit vergelijking [6] volgt dat de geometrische rek 18,1% is, hetgeen betekent dat het product net maakbaar is. Tijdens het persen is ook gebleken dat er lichte plooiën achterbleven in het product. Door het materiaal een warmtebehandeling te geven en daardoor de vloeispanning omlaag te brengen, wordt de kritische rek groter, ruim 22%; daarna was het product goed maakbaar zonder dat er plooiën in het product achterbleven.

Voor de radius van de buiglijnen is gekozen voor $r = 4$ mm. Omdat de r/t -verhouding niet groot is, kan niet de benaderingsformule uit [1] worden toegepast. Wordt de waarde van $r = 4$ mm en $t = 3$ mm ingevuld, dan volgt een maximale rek van 27%. De breukrek van het materiaal

was ongeveer 25%. Hoewel deze waarde kleiner is dan de maximale geometrische rek, trad er geen breuk op. Zoals toegelicht in § 6.1 is de breukrek vaak een conservatieve waarde, hetgeen ook hier het geval is.

8.2 Dieptrekvormen

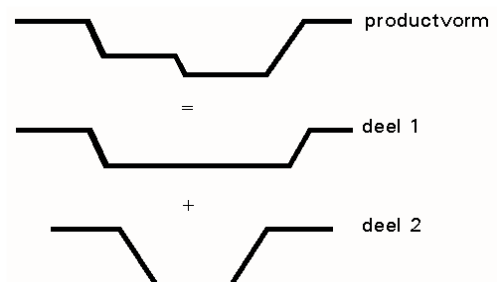
In figuur 21 is een eenvoudige conische vorm afgebeeld. Deze vorm is gemaakt van staal (FeP04) met een plaatdikte van 1 mm. De hoogte van de vorm is 40 mm en de diameter (bij de inloopradius) is 150 mm. De coniciteit (hoek met de verticaal) is 30° .

De breukrek (A_{80}) van FeP04 is 39%. Ingevuld in vergelijking [7] geeft dit een maximale producthoogte (voor een diameter van 100 mm en een dikte van 1 mm) van 25,5 mm. C_1 is dus 2,55. Voor de diameter van 150 mm wordt de maximale producthoogte (met vergelijking [9]) gelijk aan 31,2 mm. Als ook de coniciteit verwerkt wordt (vergelijking [11]), dan is de maximale producthoogte van deze vorm: $h_{\max} = 43,9$ mm. De werkelijke producthoogte, 40 mm, is dus net iets kleiner dan de maximaal haalbare producthoogte. Een geringe vergroting van de producthoogte zal dus breuk tot gevolg hebben.



figuur 21 Dieptrekvorm

Veel dieptrekachtige vormen zijn minder eenvoudig. Bij meer ingewikkelde productvormen zal de vorm ontleed moeten worden in enkele "basisvormen". De meest kritieke basisvorm (wat de hoogte/diameter verhouding betreft) zal doorgerekend moeten worden op maakbaarheid. Zo zal bij de productvorm uit figuur 22 (schematische doorsnede getekend) deel 2 bepalend zijn of de productvorm kan worden gemaakt.



figuur 22 Schematische voorstelling van samengestelde productvormen

8.3 Producten met bijzondere kenmerken

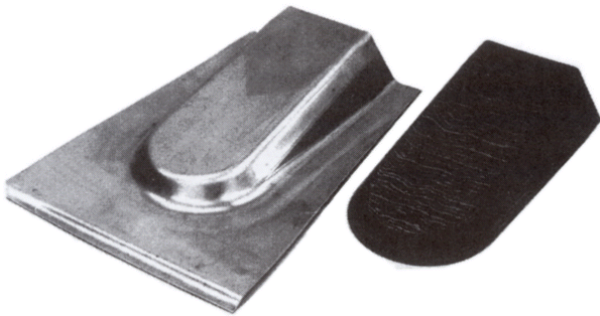
Het kan voorkomen dat een product op een andere wijze moet worden gemaakt dan op grond van de vorm kan worden aangegeven. Deze wijziging houdt dan meestal verband met productdetails of andere specifieke productkenmerken. Ook kan het voorkomen dat een product in meerdere stappen moet worden gemaakt, omdat productdetails dit vereisen.

Bijzondere oppervlakken

Een belangrijk kenmerk kan het productoppervlak zijn. Denk hierbij aan voorgelakte of gepolijste plaat. Bij voorkeur wil men deze kwetsbare oppervlakken naar het rubberkussen keren, zodat oppervlakteschadiging wordt vermeden.

Een voorbeeld hiervan is de luchthapper (zie figuur 23). Dit product is gemaakt van roestvast staal 1,5 mm dik en moet aan de buitenzijde een hoogglans kwaliteit hebben. Meestal wordt dit bereikt door het oppervlak te polijsten. Als men echter krasvorming kan voorkomen, dan wint men aanzienlijk op de tijd die nodig is voor het polijsten.

De productvorm leent zich het best om te worden geperst op een negatieve matrijs. De buitenzijde van het product komt dan echter in contact met de matrijs, hetgeen krasvorming tot gevolg kan hebben. Daarom is gekozen voor het persen op positief gereedschap (de mal is in de figuur ook weergegeven). Omdat er nu echter een sterke krimpflens ontstaat, die zelfs met de vlakke rand eraan tot plooivorming leidt, is een extra onderlegplaat gebruikt, waarmee loodrecht op de krimpflens extra trekspanningen konden worden opgewekt, waardoor de plooiën in de krimpflens verdwenen.



figuur 23 Luchthapper met een gepolijst buitenoppervlak

Bijzondere productdetails

In figuur 24 is een product weergegeven met een diepe doorzetting in het midden. Omdat het product langs de gehele omtrek rechte en gebogen flenzen heeft, wordt het materiaal als het ware aan de randen ingeklemd en kan het niet toevloeien.



figuur 24 Geflensd rubberpersproduct geperst in twee stappen

Daarom is dit product in twee stappen geperst. Het tussenproduct is in figuur 24 te zien. In het tussenproduct wordt de doorzetting geperst; vervolgens wordt de plaat op maat geknipt en vervolgens worden de flenzen aan het product geperst.



figuur 25 Stap 1: het maken van de doorzetting/rii (tussenproduct) voor het product in figuur 24

Soms komt het voor dat de zichtzijde van het product speciale details heeft die kenmerkend zijn voor het product. Deze details dienen dan "scherp" te zijn. Ook dat kan ertoe leiden dat men een geflensd product op een negatieve matrijs gaat persen of een dieptrekachtige vorm op een positieve mal.

Een andere mogelijkheid is dat men in twee stappen perst: eerst negatief vanwege de grote producthoogte in relatie tot de productdiameter; vervolgens positief om bepaalde details duidelijk in de plaat te kunnen persen.

Een voorbeeld van deze bewerkingsvolgorde wordt gegeven in figuur 26.



figuur 25 Product in twee stappen gerubberperst: eerst in een negatieve matrijs tot een bolvorm met juiste producthoogte; vervolgens is de bolvorm op de positieve matrijs geperst tot de uiteindelijke vorm

9 Economie van het rubberpersen

Rubberpersen is een proces waarbij relatief goedkoop gereedschap kan worden gebruikt. Tevens is de steltijd bij het omschakelen van het ene naar het andere product zeer laag. Uit economisch oogpunt gezien is het proces dus uitermate geschikt voor producten die in kleine hoeveelheden worden gemaakt.

Voor een juiste bepaling of rubberpersen voor een product het meest geschikte proces is, is naast technologische maakbaarheid ook een economische afweging nodig. In dit geval is het handig om een eenvoudige berekening voor de kostprijs te hanteren, zodat deze kan worden vergeleken met die van een product dat met een ander proces is vervaardigd.

De kostprijs van een rubberpersproduct wordt voornamelijk bepaald door de volgende kostensoorten:

- ▶ *eenmalige kosten*: werkvoorbereiding;
- ▶ *per batch terugkerende kosten*: logistiek en steltijd;
- ▶ *per product terugkerende kosten*: materiaal, pers, loon, rubberkoffer en slijtage rubber.

Hieronder geven we een formule voor een vereenvoudigde kostprijsberekening. Een aantal voor de vergelijkingsberekening niet relevante kosten is hierin niet opgenomen. De formule leidt dus niet tot een absolute kostprijs van het product, maar is alleen bedoeld als een vergelijkingsgetal ten behoeve van de bepaling van de proceskeuze.

De kosten van een perskoffer zijn in feite eenmalig, waardoor de afschrijvingskosten zo gering zijn, dat ze voor gebruik van deze eenvoudige formule als verwaarloosbaar mogen worden beschouwd. Voor het contactrubber geldt een levensduur voor het persen van ca. 20.000 stuks. Dat betekent een kostenaandeel van ca. € 0,03 per product. Deze kostenpost is niet in de formule opgenomen. De formule voor een eenvoudige kostprijsberekening wordt weergegeven door:

$$K_{\text{verg}} = E/p + B/b + P \cdot t$$

waarbij:

- K_{verg} = Kostprijs van het product (vergelijkingsgetal)
- E = Kosten van het gereedschap e.d. (o.a. mal en werkvoorbereiding)
- p = totaal (verwacht) aantal producten van het betreffende model
- B = Stelkosten per batch
- b = Aantal producten per (eenmalige) batch
- P = Productiekosten, pers en arbeidsloon (per min.)
- t = Cyclustijd (inclusief het invoeren en uitnemen van het product)

Aan de hand van onderstaand voorbeeld wordt geïllustreerd hoe een vergelijkingsberekening tussen rubberpersen en dieptrekken wordt uitgevoerd. Het voorbeeldproduct voor de berekening is afgebeeld in figuur 23 (luchthapper) van deze publicatie. Afmetingen van het product zijn ca. 250 × 150 × 40 mm.

Rubberpersen op een dieptrekpers met perskoffer

- E = € 1000,--
- p = 1000
- B = € 2,50
- b = 200
- P = € 1,-- per min.
- t = 1 min.

$$K_{\text{verg rubberpersen}} = 1000/1000 + 2,5/200 + 2 \times 1 = € 2,02$$

Dieptrekken met conventioneel gereedschap

- E = € 10.000,--
- p = 1000
- B = € 15,--
- b = 200
- P = € 1,-- per min.
- t = 0,2 min.

$$K_{\text{verg dieptrekken}} = 10.000/1000 + 15/200 + 1 \times 0,2 = € 10,28$$

Hieruit blijkt dat de (vergelijkings)kostprijs van een product met een totaal volume van 1000 stuks die in batches van 200 producten wordt gemaakt, voor rubberpersen veel lager ligt. De keuze zal hierbij dus op rubberpersen vallen.

10 Literatuur

- [1] Goedkoop en efficiënt metaal in juiste vorm persen met rubber. J. Sinke en L. Beumer, Innovisie, Jrg. 6, no 1, januari 1995.
- [2] Het vormen van dunne plaat in rubbermatrijzen: rubberpersen biedt nieuwe kansen. J. Sinke en L. Beumer. Metaal & Kunststof, Jrg. 33, no. 3, februari 1995.
- [3] Gummipressen - eine Alternative für die Kleinserienfertigung von kleinformatigen Blechformteilen, A. Neubauer, J. Sinke & P.J. Bolt, VDI-Berichte 1277, 1996.
- [4] "Revival van metaalplaat", artikel in Produkt, 5e Jrg. (1997), no. 4, blz. 33-34.
- [5] "Techniek rubberpersen is klaar, nu het MKB nog", bijdrage aan artikel in Technisch Weekblad, 28 Jrg. (1997), no. 44, pag. 4.
- [6] "Gummipressen - eine alternative Kleinserienfertigung", A. Neubauer, P.J. Bolt, J. Sinke, Blech, Rohre und Profile, 1/2-98, pag. 46-50.
- [7] Rubberpersen van plaat; een perstechniek voor kleinseriefabricage, J. Sinke, de Constructeur, maart 1998/3, pag. 30-33.
- [8] Rubberpersen; een productiemethode voor klein-seriefabricage en prototypen, J. Sinke, MB-Produktietechniek, oktober 1998.
- [9] Rubberpersen, een aantrekkelijk proces voor het MKB, brochure IOP-Metalen nr. 2.4 (Tech-Info blad TI.98.06).
- [10] Rubberpersen (II), Maakbaarheid van producten, brochure IOP-Metalen nr. 2.6 (Tech-Info blad TI.00.10)
- [11] Rubberpersen van plaatdelen, M. Labordus en J. Sinke, maart 1998, TU Delft (IOP-project: Innovatieve Vervormingstechnieken voor prototyping en kleine seriefabricage, contractno. C. 94.717.TO.Mlb).
- [12] Het vormen van dunne plaat in rubber matrijzen: rubberpersen biedt nieuwe kansen. J. Sinke en L. Beumer. Metaal & Kunststof, Jrg. 33, no. 3, februari 1995.
- [13] Rubberpersen van buis. P.J. Bolt, W.B. van Bavel, H.J. van der Gouw, P.J.C.M. Rozier; TNO-rapport 98MI-00515, 1998.
- [14] Economie van het rubberpersen. H. de Kruijk; TNO-rapport 98MI-00514, 1998.
- [15] IOP-Metalen Rubberpersen-Eindrapport, TNO-rapport 98-MI-00661, 1998.
- [16] Rubberpersen, een alternatieve techniek voor kleinserie plaatwerk, J. Sinke, 23 maart 1998, Syllabus Technishow '98, Utrecht, Technovision, Rotterdam.
- [17] Rubberpersen; een productiemethode voor klein-seriefabricage en prototypen, J. Sinke, MB-Produktietechniek, oktober 1998.
- [18] Industriële productie, H.J.J. Kals, C.A. van Lutterveld, K.A. Moulijn; De Vey Mesdag B.V., 1996.

BIJLAGE

A1 Het persgereedschap

Het persgereedschap bestaat uit twee hoofdcomponenten, namelijk een (doorgaans) hydraulische pers en de zogenaamde perskoffer. Over beide delen zullen in de bijlage nadere bijzonderheden worden gegeven, die nuttig zijn voor het ontwerpen van de perskoffer.

A1.1 De hydraulische pers

Voor het rubberpersen van kleine producten (ordegrootte: A4 - A3) moet men beschikken over een hydraulische pers met een perscapaciteit van 500-1000 ton. Wanneer de perskracht wordt gedeeld door het persoppervlak, dan volgt daaruit de gemiddelde persdruk die kan worden gehaald. Deze persdruk moet liggen in de orde van 300-800 bar (kg/cm²). Welke waarde men kiest hangt mede af van de productvormen, plaatmaterialen en plaatdikten die men wil verwerken. Hoe complexer de vorm, hoe stugger het materiaal (hoogte vloeigrens) en hoe dikker de plaat, des te groter de benodigde perskracht (persdruk).

A1.2 De perskoffer

Behalve een hydraulische pers moet er ook een perskoffer worden gemaakt. Hierin wordt het rubberkussen vastgezet, waarna de perskoffer tegen het bovenbed van de pers kan worden gemonteerd. Op het onderbed kunnen de persblokken worden gelegd, waarop de plaatuitslagen tot producten worden vervormd. Voor de uitvoering van een perskoffer heeft men de keuze uit twee varianten: een ronde of een rechthoekige perskoffer. Een ronde perskoffer heeft als voordeel dat deze iets lichter uitgevoerd kan worden; een rechthoekige perskoffer is vaak beter (meer flexibiliteit) met het oog op de te maken producten. Belangrijk bij het dimensioneren van de perskoffer zijn de krachten/drukken die op de koffer werken tijdens een perscyclus. De hoge persdruk is niet alleen werkzaam op de plaatuitslag, maar drukt ook op de wanden van de perskoffer; immers, het rubber reageert als een vloeistof. Dit heeft een dikwandige perskoffer tot gevolg.

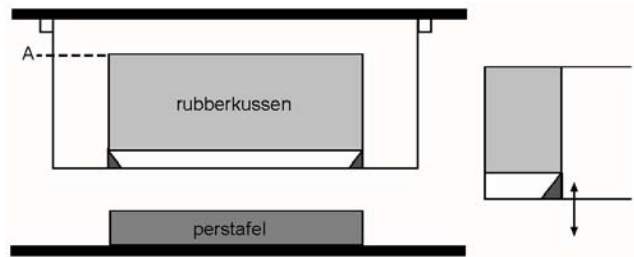
1.3 De berekeningen van de koffer

De hoogte van de perskoffer is gerelateerd aan de hoogte van de matrijzen of mallen die worden gebruikt. Als vuistregel geldt dat de dikte/hoogte van het rubberkussen minstens 3 keer zo groot is als de hoogte van de gebruikte mallen. De wandhoogte van de perskoffer is 2-3 cm hoger dan de hoogte van het rubberkussen. Als de persdruk, de hoogte van het rubberkussen en de wandhoogte van de perskoffer bekend zijn, dan is de benodigde wanddikte van de perskoffer te schatten. Voor ronde perskoffers kan men dan gebruik maken van de formules voor een dikwandige buis. Voor rechthoekige perskoffers kan men gebruik maken van "vergeet-me-nietjes", om een **schatting** te maken van de benodigde wanddikte (b). Daarbij wordt ervan uitgegaan dat de krachten de kortste weg zoeken naar de stijve randen en hoeken van de perskoffer en dat door buiging de grootste spanningen worden opgewekt. Ter plaatse van A (zie figuur A1) is het maximale buigende moment $M = 0,5 \times P \times (\text{kussenhoogte})^2$.

stel: $P = 500 \text{ bar} = 50 \text{ MPa}$, kussenhoogte = 100 mm en $R_{0,2} = 200 \text{ MPa}$, dan volgt:

$$M = 0,5 \times P \times (\text{kussenhoogte})^2 \\ = 250.000 \text{ Nmm/mm breedte.}$$

Als de inwendige spanningsverdeling elastisch moet blijven (dus lineair verdeeld is), volgt uit de vergelijking $M < 0,33 \times R_{0,2} \times b^2$ dat de minimale wanddikte b van de perskoffer circa 61 mm bedraagt.



figuur A1 Doorsnede van een perskoffer

Het is verstandig hierop nog een veiligheidsfactor (van 1,5 à 2) toe te passen, zodat te allen tijde voorkomen wordt dat de perskoffer plastisch vervormt. Bovendien: het gewicht van de perskoffer is ondergeschikt, de koffer is toch te zwaar om deze zonder hulpmiddelen in de pers te monteren.

A1.4 Toleranties

De hoeken tussen de wanden onderling en tussen de wanden en de bodem van de perskoffer dienen te worden afgerond ($r = 15-35 \text{ mm}$) om spanningsconcentraties te vermijden.

De grootte van de mallen, met name de positieve mallen, moeten aangepast zijn aan de grootte van de perskoffer. Bij voorkeur moet de grootte van de afstand tussen de mal en de wanden van de perskoffer 1 à 2 keer de malhoogte zijn. Voor de negatieve mallen, als de buitenmaten gelijk zijn aan de afmetingen van de perstafel, geldt dit niet. De speling tussen de perstafel op het onderbed (waarop de mallen/matrijzen worden gelegd, dient beperkt te blijven tot 1 à 2 mm. Als deze ruimte groter is, dan kan het rubber tussen de perstafel en de wanden van de perskoffer worden geperst, wat de slijtage aanzienlijk vergroot. Beter is het om een afsluitring toe te passen, die de spleet afdekt (zie detail in figuur A1). Ook hiervoor geldt dat plastische deformatie van de ring moet worden voorkomen.

A1.5 Het rubberkussen

Het rubberkussen wordt meestal opgebouwd uit twee lagen: een dikke laag van goed vervormbaar rubber (hardheid Shore A60-70) en een slijtlaag, meestal met een iets grotere hardheid (Shore A 80-90). De slijtlaag is omkeerbaar en makkelijk verwisselbaar. Het rubberkussen behoeft meestal niet speciaal te worden vastgezet. Enkele keren persen volstaat meestal om het rubber te laten klemmen in de perskoffer (mits het kussen nauwpassend wordt aangemaakt). Om de slijtage van het rubberkussen te beperken, is het goed om scherpe plaatranden te vermijden. Verder moet men ook bij het ontwerp van de mallen, met name de positieve mallen, de afrondingshoeken voldoende groot kiezen.

Opmerking

Positieve persgereedschappen kunnen los op de perstafel worden gelegd; deze behoeven niet uitgelijnd te worden. Voor negatieve mallen kan men het best de uitwendige maten gelijk nemen aan de maten van de perstafel.

Toelichting

Deze voorlichtingspublicatie is een herziening van twee eerder verschenen publicaties (TI.98.06 "Rubberpersen, een aantrekkelijk proces voor het MKB" en TI.00.10 "Rubberpersen II, maakbaarheid van producten"). Deze publicaties zijn in 1998 en 2000 door IOP-Metalen in samenwerking met de FME uitgegeven ten behoeve van industrie en onderwijs.

De publicatie TI.98.06 behandelde de principes van het rubberpersen met voorbeelden. In publicatie TI.00.10 werd het ontwerp van de verschillende vormen behandeld aan de hand van rekenvoorbeelden en werd tevens aandacht geschonken aan het ontwerp van de perskoffer. Het project was het resultaat van een samenwerking tussen TNO Industrie en de Technische Universiteit Delft. Beide publicaties alsmede de daarin beschreven onderzoeksresultaten waren tot stand gekomen in het kader van het Innovatieve Onderzoekproject Metalen (IOP-Metalen). Dit project is van 1988 - 2000 uitgevoerd door een aantal universiteiten en researchinstituten, in opdracht en onder supervisie van Senter(Novem) namens het Ministerie van Economische Zaken.

In het kader van actualisering van voorlichtingspublicaties (een samenwerkingsverband tussen FDP, FME, NIL, NIMR, Syntens en TNO), zijn bovengenoemde publicaties samengevoegd en aangepast aan de huidige situatie door H. de Kruijk (TNO Industrie en Techniek) in samenwerking met H.J.M. Raaijmakers (FDP) en J. Borsboom (FDP).

Technische informatie:

Voor technisch inhoudelijke informatie over de in deze voorlichtingspublicatie behandelde onderwerpen kunt u zich richten tot: H.J.M. Raaijmakers (tel.: 030 - 600 00 05; e-mail: raaijmakers@fdp.nl) en J. Borsboom (tel.: 030 - 600 00 05; e-mail: jan.borsboom@planet.nl).

Informatie over, en bestelling van VM-publicaties, Praktijkbevelingen en Tech-Info-bladen:

Vereniging FME-CWM/Industrieel Technologie Centrum (ITC)

Bezoekadres: Boerhaavelaan 40,
2713 HX Zoetermeer
Correspondentie-adres: Postbus 190,
2700 AD Zoetermeer
Telefoon: (079) 353 11 00/353 13 41
Fax: (079) 353 13 65
E-mail: info@fme.nl
Internet: www.fme.nl

© Vereniging FME-CWM/januari 2008 - 01

Niets uit deze uitgave mag worden vervaelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM
Afdeling Technologie en Innovatie
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon 079 - 353 11 00
telefax 079 - 353 13 65
e-mail: info@fme.nl
internet: www.fme.nl



**Netherlands Institute
for Metals Research**



SenterNovem



TU Delft

